

# PRODUCCION PRIMARIA FITOPLANTONICA EN TRES ESTEROS DE BAHIA MALAGA Y BUENAVENTURA, PACIFICO ORIENTAL COLOMBIANO

**David Friedrich Pacheco.**

*Universidad del Valle, Apartado Aéreo 25360, Cali, Colombia.*

*david.friedrich@correounivalle.edu.co*

**Enrique Javier Peña Salamanca.**

*Universidad del Valle, Apartado Aereo 25360, Cali, Colombia.*

*enrique.pena@correounivalle.edu.co*

**Alán Giraldo López.**

*Universidad del Valle, Apartado Aéreo 25360, Cali, Colombia.*

*alan.giraldo@correounivalle.edu.co*

## RESUMEN

Se evaluaron las variaciones espaciales y temporales de la producción primaria fitoplanctónica neta en tres esteros en la bahía de Málaga y Buenaventura, Pacífico Oriental Tropical Colombiano, utilizando el método de botellas claras y oscuras, en julio y noviembre de 2015 y abril de 2016. Se realizaron tres monitoreos en los esteros principales de cada localidad, registrando la temperatura, salinidad, clorofila-a, profundidad y transparencia del agua en tres puntos de la marea. Además, se tomaron muestras para la determinación de nutrientes ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_3\text{-N}$  y  $\text{PO}_4^{3-}$ ) en la estación Pianguita y Valencia, con estos valores se determinó NT ( $\text{NO}_2 + \text{NO}_3 + \text{NH}_3\text{-N}$ ) y se calculó la relación de Redfield (N:P). Se encontró que los valores de productividad bruta y neta presentaron dos picos en las localidades de Pianguita ( $470,2 \pm 26,7 \text{ mgCm}^3/\text{h}$ ) y San Pedro ( $426,3 \pm 46,5 \text{ mgCm}^3/\text{h}$ ) mientras que en Quebrada Valencia los valores fueron menores y la respiración estuvo por encima del carbono fijado (producción neta). Por su parte el nitrógeno total fue mayor en Pianguita y la relación N:P mostró que ambos sistemas estuvieron en general limitados por este nutriente. No se encontraron diferencias significativas en las variaciones espaciales de la producción primaria entre las localidades ( $p=0,289$ ), pero si se detectaron temporales ( $p=0,04$ ). La PNN en la zona estudio parece estar asociada a la dinámica de las condiciones ambientales locales, siendo, los resultados de esta investigación un punto de referencia de la producción primaria en los ambientes estuarinos tropicales de la costa pacífica Colombiana, Pacífico Oriental Tropical.

*Palabras clave: clorofila-a, estuarios, fitoplancton, nutrientes, pacifico colombiano.*

## ABSTRACT

The spatial and temporal variations of the net primary phytoplankton productivity were evaluated in three estuaries in the Bay of Malaga and Buenaventura, Eastern Tropical Pacific Colombian, using the method of light and dark bottles, in July and November of 2015 and April of 2016. Three monitoring were performed in the main estuaries of each locality, recording the temperature, salinity, chlorophyll-a, depth and transparency of the water at three points of the tide. In addition, samples were taken for the determination of nutrients ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_3\text{-N}$  and  $\text{PO}_4^{3-}$ ) at the Pianguita and

Valencia station, with these values NT ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_3\text{-N}$ ) was determined and it was calculate the Redfield (N:P) ratio. It was found that the gross and net productivity values presented two peaks in the stations of Pianguita ( $470.2 \pm 26.7\text{mgCm}^3/\text{h}$ ) and San Pedro ( $426.3 \pm 46.5\text{mgCm}^3/\text{h}$ ) while in Quebrada Valencia values were lower and respiration was above of net production. On the other hand, the total nitrogen was higher in Pianguita and the N:P ratio showed that both systems were generally limited by this nutrient. No significant differences were found in the spatial variations of primary net production between the localities ( $p=0.289$ ), but temporary were detected ( $p=0.04$ ). The PNN in the study area seems to be associated to the dynamics of the local environmental conditions, being the results of this research a benchmark for primary productivity in the tropical estuarine environments of Colombian Pacific coast, Eastern Tropical Pacific.

*Keywords: chlorophyll-a, colombian pacific, estuaries, nutrients, phytoplankton.*

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas de estuario o esteros son cuerpos de agua parcialmente encerrados que se extienden hasta los límites de la influencia mareal dentro de los cuales el agua marina que entra por una o varias conexiones con el mar abierto se mezcla y diluye con el agua dulce proveniente del drenaje terrestre (Perillo 1995), esta dinámica permite que se generen salinidades intermedias y, por lo tanto, aguas salobres. Al igual que las lagunas, estos pueden estar parcialmente encerrados por barrera; son de dinámica y batimetría compleja, bioquímicamente activos, presentan circulación única y exhiben distintas dinámicas temporales frente al mar y en los límites ribereños (Monbet 1992, Adame *et al.* 2011, Miththapala 2013).

El fitoplancton es uno de los componentes biológicos con un papel preponderante en los ciclos de materiales y energía en los estuarios, esta característica les otorga una alta productividad potencial y redes tróficas muy diversas con altas biomásas de productores (Gil-Aguilar *et al.* 2013). Entre otras cosas, los esteros presentan una interacción importante con los sistemas adyacentes al estuario como los bosques de mangle con adaptaciones especiales que han permitido su sobrevivencia en suelos de alta sanidad y deficiencias periódicas de

oxígeno, esta relación puede permitir que el bosque aporte detritus a la columna de agua, sirva como sumidero de nutrientes inorgánicos y, en conjunto con los ciclos de inundación mareal, poseer el potencial para la exportación de material orgánico que puede estimular la producción primaria acuática y sostener la productividad secundaria en aguas estuarinas costeras (Rivera-Monroy *et al.* 1995).

Estas características ubican a los estuarios como sistemas de alta productividad primaria; sin embargo, esta va a depender de múltiples factores que operan en la columna de agua como la calidad, cantidad y duración de la radiación solar, la disponibilidad de nutrientes y la transparencia de la zona eufótica, en donde se desarrollan las comunidades fitoplanctónicas (bacterias y microalgas), (Edding *et al.* 2006, Gutiérrez-Mendieta *et al.* 2006, Verma *et al.* 2012). Estos factores a su vez, son modulados por los aportes fluviales y los intercambios mareales los cuales alternarán su dominancia en función de los principales periodos climáticos que se presentan a lo largo del año (Gutiérrez-Mendieta *et al.* 2006).

El estudio de la producción primaria en los sistemas estuarinos representa la fijación de material orgánico en la etapa inicial de la red trófica (Gil-Aguilar *et al.* 2013), lo que puede

permitir en conjunto con los procesos que modulan la producción primaria establecer una primera radiografía sobre el estado del ecosistema y su importancia ecológica. Sin embargo, la información disponible sobre la tasa, magnitud y variación de la producción primaria en los sistemas estuarinos tropicales es menor respecto a lo que ha sido descrito para ambientes estuarinos de zonas templadas. En términos generales, la productividad primaria acuática en los esteros tropicales, como los de la laguna Términos en el Golfo de México, presenta un marcado patrón estacional con tendencia a incrementar en los meses de mayor precipitación, probablemente como consecuencia del incremento en los aportes de material orgánico proveniente de los bosques de mangle del estero Pargo. Esta tendencia también ha sido reportada para ambientes estuarinos del Pacífico México por Gutiérrez- Mendieta *et al.* (2006), quienes realizaron la caracterización estacional de los parámetros fisicoquímicos y la producción primaria fitoplanctónica en dos esteros del estado de Chiapas, México; encontrando que la biomasa y producción primaria se favorecen durante las dos temporadas de precipitación local (alta y bajas). Además de los nutrientes, la salinidad y la turbidez han sido identificados como variables ambientales que pueden llegar a tener efecto significativo sobre la productividad primaria en un ambiente estuarino tropical.

Según Devassy & Goes (1989) la salinidad en el complejo estuarino Mandovi-Zuari (Oeste de la costa de la India) se correlacionó significativamente con la concentración de células fitoplanctónicas, clorofila-a y la producción primaria. De acuerdo con estos autores, la salinidad determinó en esta localidad la distribución, abundancia y producción primaria del fitoplancton, ya que a muy bajas concentraciones de sales los organismos fitoplanctónicos podrían experimentar estrés fisiológico severo lo cual reduciría su tasa metabólica.

Por otra parte, la turbidez ha sido relacionada de manera directa con la productividad en los ambientes estuarinos tropicales, ya que limita la extensión de la capa fótica en la columna de agua. Por ejemplo, durante la época del pre-monzón y monzón en la costa occidental de la India, la turbidez en los ambientes estuarinos se incrementa debido al aumento de la precipitación, mientras que durante la época del post-monzón, la turbidez disminuye incrementando la profundidad de penetración de la luz dentro de la columna de agua (Krishna-Kumari *et al.* 2002). Como resultado de esta variación temporal de la turbidez, durante la época de lluvias la producción primaria en estos ambientes estuarinos fue menor que durante la época seca.

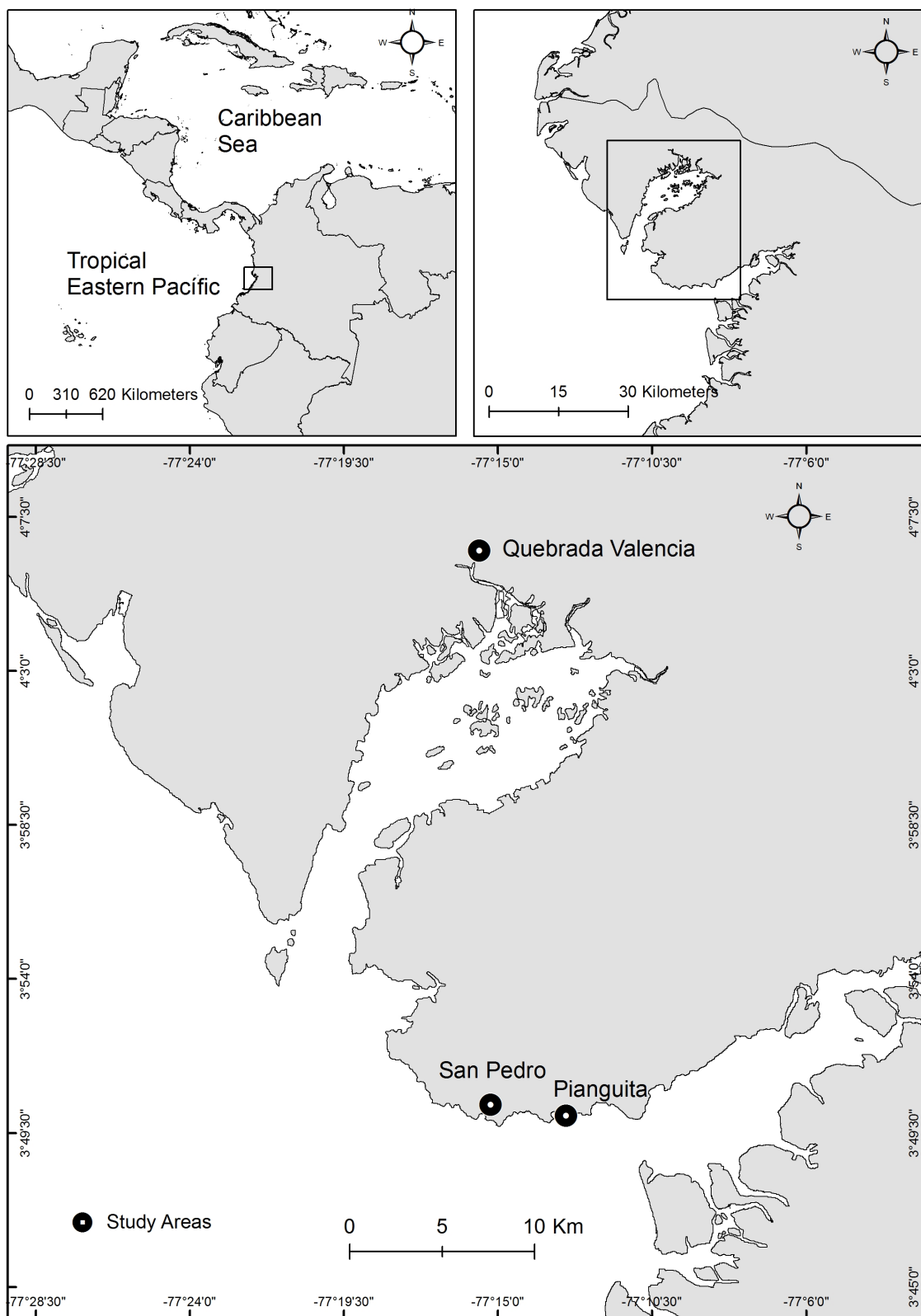
En este contexto es claro que la producción primaria fitoplanctónica de una zona estuarina tropical dependerá de sus características específicas, como la estructura fisiográfica de los sistemas adyacentes (bosques de mangle), el régimen hídrico al que esté sujeta, la influencia mareal, los vientos y en general la variación climática y estructura edáfica local (Lugo & Snedaker 1974, Rivera Monroy *et al.* 1998, Burford *et al.* 2012, McKlusky 2013). Por lo tanto, la biomasa y productividad primaria acuática en los estuarios tropicales pueden variar de un sistema con respecto a otro. En el presente trabajo se estudió la productividad primaria fitoplanctónica de tres esteros en bahía de Málaga y Buenaventura, Pacífico Oriental Colombiano, con el propósito de documentar su variación espacial y temporal (escala mareal) en julio y noviembre de 2015 y abril de 2016.

## MÉTODOS

Esta investigación se realizó en el litoral Pacífico Colombiano (Departamento, del Valle del Cauca) en tres estuarios macromareales asociados a bosque de

manglar en Bahía Málaga (estero Quebrada Valencia; 4°10'0.88"N-77°25'15"W), el Ítmo de Pichidó (estero de San Pedro; 3°83'58.8"N-77°25'88.8"W) y la bahía de Buenaventura (estero de Piangüita; 3°83'89"N-77°20'50"W) (Fig. 1). El clima en esta región es de tipo húmedo tropical (temperatura promedio 26°C), con alta

pluviosidad asociada a dos periodos de lluvias, siendo los meses más cálidos de enero hasta abril y los más lluviosos de mayo a diciembre, las mareas son mixtas semidiurnas con amplitud entre 4-5 metros (Peña-Salamanca 2008, Correa & Morton 2010, Castellanos-Galindo & Krumme 2015).



**Figura 1.**

**Figura 1.** Localización geográfica de los esteros Quebrada Valencia, San Pedro y Pianguita. Pacifico Oriental Colombiano.

Bahía Málaga es un accidente costero bordeado al sur por colinas terciarias con un área aproximada de 136 km<sup>2</sup> que constituyen un estuario de origen tectónico caracterizado por presentar bosques con cobertura de manglar, la temperatura del mar varía entre 25 y 29°C con salinidades de 18-28 psu en la zona más externa y de 1,2 y 10 psu en los ríos durante marea alta (Lazarus-Agudelo & Cantera-Kintz 2007, Lucero *et al.* 2012, Castellanos-Galindo & Krumme 2015). La bahía de Buenaventura conforma un estuario de inundación, definido por un antiguo valle fluvial, poco profundo con un área de 70 km<sup>2</sup> y una canal central de 16 km de longitud (Peña-Salamanca 2008) variando en su interior la salinidad entre 0-30 ups, mientras que en el Istmo de Pichindó la salinidad varía entre 11 y 20 ups en marea baja y alta respectivamente.

Se realizaron tres salidas de campo a los esteros de Valencia y Pianguita en los meses de julio y noviembre de 2015 y abril de 2016. San Pedro se monitoreo desde noviembre y posteriormente en abril. Se tomaron muestras de agua estuarina con una botella Niskin (1,5L) en la zona eufótica que se determinó con un disco Secchi de 20 cm y se realizaron mediciones de oxígeno disuelto utilizando el método de titulación de botellas claras y oscuras como lo sugieren Gaarder & Gran (1927), citado por Naundurf (2010), en tres puntos de la marea, el tiempo de incubación fue de dos horas y las titulaciones de oxígeno se realizaron *in-situ*. Se registró la temperatura y salinidad del agua con una sonda YSI-85, la concentración de la clorofila-a con un fluorómetro Aquafluor, la profundidad total con un profundímetro y se obtuvieron datos de precipitación promedio mensual del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM 2016).

Además, se colectaron y almacenaron en frío (-20°C) muestras de agua para la determinación en laboratorio de nutrientes. Los fosfatos (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) se midieron con el método de ácido ascórbico, el nitrógeno amoniacal (NH<sub>3</sub>-N) con el método nessler, los nitritos (NO<sub>2</sub>) y nitratos (NO<sub>3</sub>) con el método diazotización y reducción de cadmiun, respectivamente. Las concentraciones se transformaron a mg/m<sup>3</sup> y se determinó la relación N:P establecida originalmente por Redfield (1958). Con los datos obtenidos de la titulación *in-situ* se realizaron comparaciones entre las medias iniciales y finales del oxígeno medido para la estimación de los valores de productividad primaria bruta (PPB), neta (PNN) y la respiración (R) en todas las localidades, en miligramos de O<sub>2</sub> disuelto por litro y hora (mgO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/h) y, se transformaron a unidades de Carbono utilizando el factor de conversión (0,375) propuesto por Wetzel & Likens (1991) y Naundorf (2010). Los datos se reportaron en mgC/m<sup>3</sup>/h.

Se utilizaron correlaciones de Pearson para evaluar la relación de la productividad neta con las concentraciones de nutrientes, la salinidad, la temperatura y la clorofila-a. Además, Se utilizaron análisis de varianza (ANOVA) para evaluar las variaciones de la producción primaria neta con respecto a las estaciones de muestreo (variación espacial), la salinidad, la temperatura y la clorofila-a.

De acuerdo con el régimen mareal semidiurno del Pacífico oriental para el análisis de las variaciones temporales se agruparon los datos de las tres localidades de acuerdo a la altura del agua promedio, en 4 categorías de altura mareal o CAM: La categoría A hace referencia al intervalo entre 0 y 2 m bajamar-subiendo, la B entre 2 y 4,1 m pleamar, la C entre 4,1 y 2 m pleamar-bajando y la D entre 2 y 0 m bajamar. Se realizó un análisis de varianza con el fin

de evaluar las variaciones de la producción neta y la clorofila-a, frente a las CAM. Los datos en general mostraron normalidad y homogeneidad de varianzas (Shapiro-Wilk y Barlett, respectivamente).

## RESULTADOS

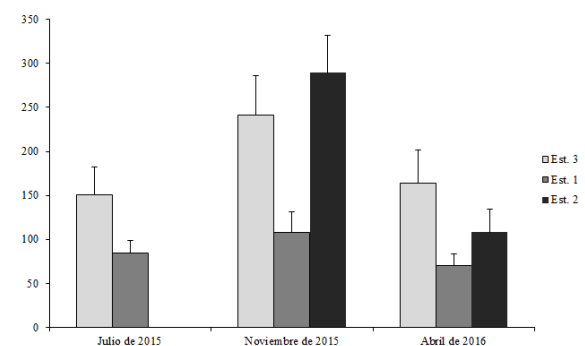
Las precipitaciones no presentaron mayores fluctuaciones entre los meses de muestreo y el periodo se consideró lluvioso (Julio: 520 mm: Noviembre: 558 mm y abril: 447 mm). Se encontró una anomalía negativa de estos meses con respecto a la precipitación promedio por mes que reporta el IDEAM para los últimos 10 años.

La producción fitoplanctónica bruta que equivale a la producción total del fitoplancton, presento el mayor pico en Pianguita ( $\pm$  Error estándar) ( $470,2 \pm 26,7$  mgC/m<sup>3</sup>/h) durante noviembre, mientras que el mínimo fue de  $226,6 \pm 45,5$  mgC/m<sup>3</sup>/h y se registró en San Pedro en abril, sin embargo, esta estación en noviembre presento el segundo pico más alto de producción bruta ( $426,3 \pm 46,5$  mgC/m<sup>3</sup>/h). En Valencia la PPB no presento mayores fluctuaciones entre julio ( $324,6 \pm 14,1$  mgC/m<sup>3</sup>/h) y noviembre ( $321,6 \pm 57,8$  mgC/m<sup>3</sup>/h), aunque en abril disminuyó a  $242,1 \pm 16,4$  mgC/m<sup>3</sup>/h (Tabla 1).

**Tabla 1.** Valores promedio de la productividad primaria, variables fisicoquímicas y nutrientes (nitrógeno total y relación Redfield N:P) registrados en Quebrada Valencia, San Pedro y Pianguita, Pacifico Oriental Colombiano. En paréntesis se muestran el ES: Error estándar.

VARIABLE/LOCALIDAD	SAN PEDRO		PIANGUITA			VALENCIA		
	Noviembre	Abril	Julio	Noviembre	Abril	Julio	Noviembre	Abril
Temperatura del agua (°C)	29,7 (0,3)	28,1 (0,1)	29,35 (1)	27,3 (0,7)	27,4 (0,3)	27,5 (0,48)	27,5 (0,1)	28 (0,2)
Salinidad (ups)	16,9 (2,8)	34,5 (1,2)	21,7 (1,4)	11,9 (4,1)	14,8 (5,4)	24,6 (1,25)	11,3 (0,9)	24 (1,8)
clorofila-a (mg/m <sup>3</sup> )	3,4 (0,27)	3,5 (0,2)	3,1 (0,2)	5,9 (0,3)	5,2 (0,1)	4 (0,3)	5,3 (0,2)	4,1 (0,3)
Profundidad Secchi (m)	1,2 (0,4)	0,9 (1,2)	0,9 (0,5)	1,2 (0,8)	1 (0,5)	1 (0,2)	1 (0,25)	0,9 (0,71)
Produccion Bruta(mgC/m <sup>3</sup> /h)	426,3 (46,5)	226,6 (45,5)	302 (20,1)	470,2 (26,7)	282,8 (62,8)	324,6 (14,1)	321,4 (57,8)	242,1 (16,4)
Produccion Neta (mgC/m <sup>3</sup> /h)	289,2 (42,4)	107,9 (26,48)	150,7 (31,78)	241,6 (44,22)	163,4 (37,73)	84,1 (14)	107,7 (23,3)	69,9 (13,1)
RESPIRACIÓN mgC/m <sup>3</sup> /h)	137 (16,5)	118,8 (19)	150,3 (11,13)	228,6 (30,2)	119,5 (25,1)	240 (0,0)	213,8 (38,3)	263,5 (20,9)
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (μmol/l)			10,5 (2,5)	1,8 (0,4)	3,9 (1,4)		10,1 (1,8)	1,4 (0,4)
NH <sub>3</sub> -N (μmol/l)			60,1 (9,8)	12,1 (0,7)	61,2 (16,3)		22,8 (3,1)	6 (0,5)
NO <sub>2</sub> (μmol/l)			2,7 (0,6)	0,6 (0,1)	0,6 (0,2)		0,6 (0,1)	0,4 (0,1)
NO <sub>3</sub> (μmol/l)			8,5 (0,7)	4,9 (0,6)	6 (0,8)		3,9 (0,6)	6 (0,4)
Nitrogeno total NT (mg/m <sup>3</sup> )			1080,6	421,4	1722,1		641,3	483,7
N:P			2,2	2,5	5,8		0,7	3,6

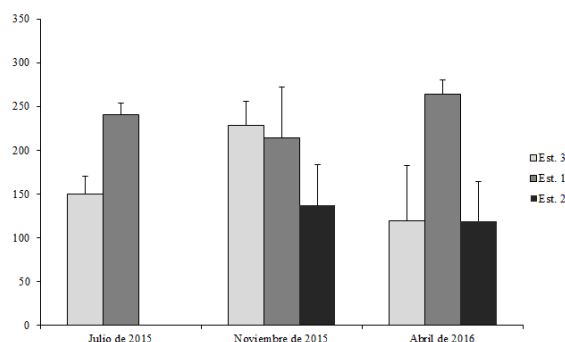
La producción primaria neta en Valencia presentó valores bajos (julio:  $84,1 \pm 14$  mgC/m<sup>3</sup>/h, noviembre:  $107,7 \pm 23,3$  mgC/m<sup>3</sup>/h, abril:  $69,9 \pm 13,1$  mgC/m<sup>3</sup>/h) al compararla con la producción de Pianguita y San Pedro. La respiración fue mayor a la fijación de carbono en todos los meses de muestreo (julio:  $240 \pm 0$  mgC/m<sup>3</sup>/h, noviembre:  $213,8 \pm 38,3$  mgC/m<sup>3</sup>/h y abril:  $263,5 \pm 20,9$  mgC/m<sup>3</sup>/h) este comportamiento no se observó al comparar la productividad con Pianguita y San Pedro, aunque la R en esta última estación fue ligeramente mayor en abril (Fig. 2, Fig. 3, Tabla 1).



**Figura 2.**

**Figura 2.** Variaciones espaciales de la producción primaria neta promedio

(mgC/m<sup>3</sup>/h) en los tres esteros evaluados (Est 1: Valencia; Est 2: San Pedro; Est 3: Pianguita), Pacifico Oriental Colombiano. Las barras indican ES: Error estándar.



**Figura 3.**

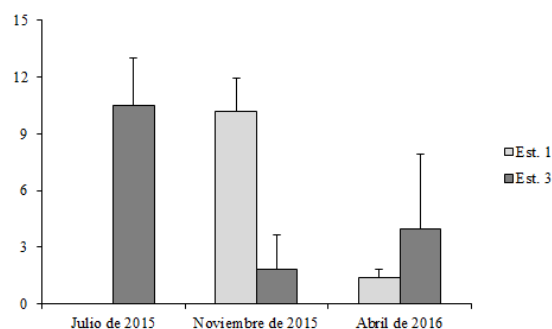
**Figura 3.** Variaciones espaciales de la respiración promedio (mgC/m<sup>3</sup>/h) en los tres esteros evaluados (Est 1: Valencia; Est 2: San Pedro; Est 3: Pianguita), Pacifico Oriental Colombiano. Las barras indican ES: Error estándar.

Los picos más altos de PNN se presentaron en noviembre en San Pedro y Pianguita con valor promedio de  $289,2 \pm 42,4$  mgC/m<sup>3</sup>/h y  $241,6 \pm 44,2$  mgC/m<sup>3</sup>/h, respectivamente. Esto, coincidió con los picos de PPB encontrados para ambos esteros, en ese mismo mes. El valor mínimo de PNN ocurrió en Valencia y fue de  $69,95 \pm 13,1$  mgC/m<sup>3</sup>/h (Fig. 2, Tabla 1). No se detectaron diferencias significativas en las variaciones espaciales de la producción primaria neta en la zona de estudio ( $p = 0,3$   $r^2 = 23,8$ ).

La temperatura del mar fue similar durante todo el estudio, en promedio la máxima registrada fue de  $29,72^\circ \pm 0,3^\circ$  C y la mínima de  $27,3 \pm 0,7^\circ$  C. La salinidad presento menores valores en Pianguita ( $11,9 \pm 4,1$  ups) y Valencia ( $11,3 \pm 0,9$  ups) en noviembre, mientras que en julio y abril fueron mayores. San Pedro presento el mayor pico registrado en la zona con un valor promedio de  $34,5 \pm 1,2$  ups en el mes de abril (Tabla 1).

La clorofila-a presentó dos picos entre los esteros Pianguita ( $5,9 \pm 0,3$  mg/m<sup>3</sup>) y Valencia ( $5,3 \pm 0,2$  mg/m<sup>3</sup>) en noviembre, lo cual concuerda con los valores bajos de salinidad registrados en ese mes para ambas estaciones. La clorofila-a en San Pedro no mostró grandes fluctuaciones entre los meses de muestreo (Tabla 1).

Las concentraciones de fosfatos en Pianguita fluctuaron entre los meses de muestreo, presentando un pico en julio de  $10,5 \pm 2,5$   $\mu$ mol/l y menores valores en noviembre y abril. En Valencia se registró un pico similar al de Pianguita  $10,1 \pm 1,8$   $\mu$ mol/l en noviembre y las concentraciones fueron menores en abril ( $1,4 \pm 0,4$   $\mu$ mol/l) (Fig. 4, Tabla 1).



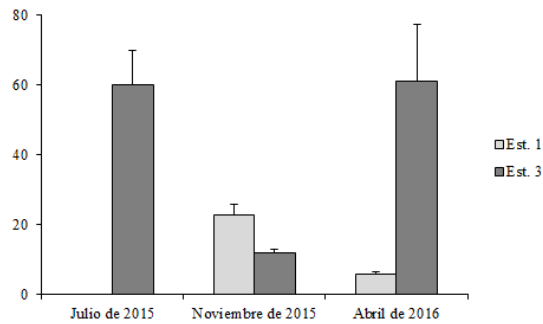
**Figura 4.**

**Figura 4.** Concentraciones promedio ( $\mu$ mol/l) de fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), en los esteros de Pianguita (Est. 3) y Valencia (Est. 1). Las barras indican ES: Error estándar.

El nitrógeno amoniacal presentó dos picos similares en Pianguita para el mes de julio ( $60,1 \pm 9,8$   $\mu$ mol/l) y abril ( $61,2 \pm 16,3$   $\mu$ mol/l), y menores concentraciones en noviembre ( $12,1 \pm 0,7$   $\mu$ mol/l). Valencia presentó en general concentraciones menores con respecto a los dos picos registrados en pianguita, sin embargo, en noviembre el  $\text{NH}_3\text{-N}$  en Valencia fue mayor ( $22,7 \pm 3,1$   $\mu$ mol/l) a la concentración registrada en



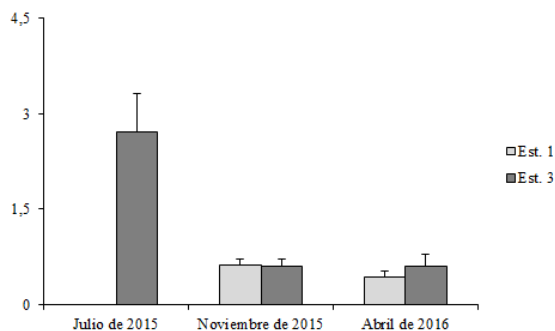
Piangüita. (Fig. 5, Tabla 1).



**Figura 5.**

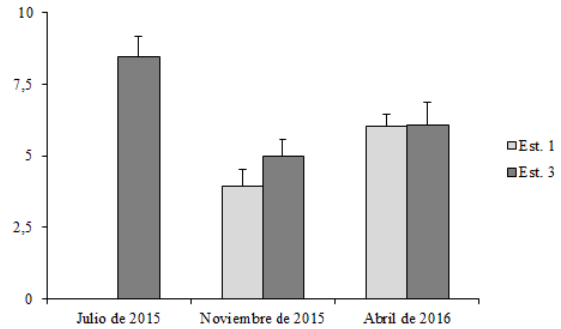
**Figura 5.** Concentraciones promedio ( $\mu\text{mol/l}$ ) de nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ) en los esteros de Pianguita (Est. 3) y Valencia (Est. 1). Las barras indican ES: Error estándar.

Las concentraciones de nitritos fluctuaron entre  $0,4\text{-}0,6 \mu\text{mol/l}$  en las dos localidades en noviembre y abril. Piangüita presentó en julio un pico de  $2,7 \pm 0,6 \mu\text{mol/l}$ . Los nitratos en Piangüita fluctuaron entre  $4,9\text{-}8,5 \mu\text{mol/l}$  y en Valencia entre  $3,9\text{-}6 \mu\text{mol/l}$  (Fig. 6, Fig. 7, Tabla 8). El nitrógeno total presentó en Piangüita valores entre  $421\text{-}1722 \text{ mg/m}^3$  y en Valencia entre  $483\text{-}641 \text{ mg/m}^3$ .



**Figura 6.**

**Figura 6.** Concentraciones promedio ( $\mu\text{mol/l}$ ) de nitritos ( $\text{NO}_2$ ) en los esteros de Pianguita (Est. 3) y Valencia (Est. 1). Las barras indican ES: Error estándar.

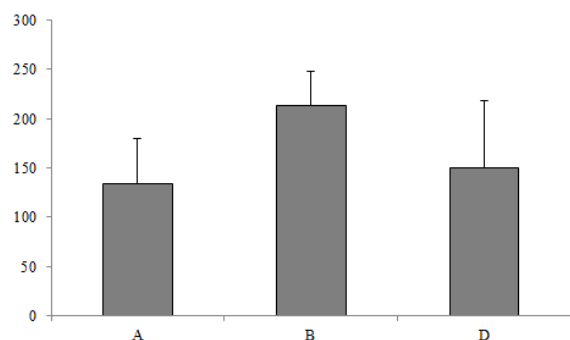


**Figura 7.**

**Figura 7.** Concentraciones promedio ( $\mu\text{mol/l}$ ) de nitrato ( $\text{NO}_3$ ) en los esteros de Pianguita (Est. 3) y Valencia (Est. 1), las barras indican ES: Error estándar.

No se encontró una relación y diferencias estadísticas significativas de la PNN con la salinidad ( $p=0,85$ ,  $r^2=23,86$ ), temperatura ( $p=0,85$ ,  $r^2=23,89$  y la clorofila-a ( $p=0,19$ ,  $r^2=31,52$ ). Además, no se encontró una correlación significativa con los nitritos ( $p=0,35$ ), nitratos ( $p=0,51$ ), nitrógeno amoniacal ( $p=0,72$ ) y los fosfatos ( $p=0,82$ ). Sin embargo, la clorofila-a presentó una relación negativa y significativa con la salinidad promedio en la zona de estudio ( $\text{Pearson}=-0,48$ ,  $p=0,02$ ).

En análisis con respecto a las categorías de altura mareal detectó diferencias significativas en la PNN entre las categorías A, B y C ( $p=0,04$ ,  $r^2=32,88$ ) siendo significativamente mayor la productividad durante la marea alta con respecto a la baja ( $p=0,04$ ) (Fig. 8). No se detectaron diferencias significativas en las variaciones de la clorofila-a frente a las categorías ( $p=0,9$ ).



**Figura 8.**

**Figura 8.** Variaciones temporales de la producción primaria neta ( $\text{mgC/m}^3/\text{h}$ ) frente a las categorías de altura mareal (A, B, D) establecidas para los esteros de Valencia, San Pedro y Pianguita. Las barras representan ES: Error estándar

## DISCUSIÓN

El análisis de las variaciones espaciales de la producción neta no mostró significancia estadística, pero el comportamiento de la productividad fue diferente en el estero Quebrada Valencia con respecto a los esteros San Pedro y Pianguita. Un factor importante a considerar en el estudio de estos sistemas es la dinámica hidrológica y geomorfológica que presentan. En este caso, Pianguita y San Pedro son esteros de borde con mayor influencia costera y Quebrada Valencia un estero riberino (Kjerfve 1990).

La productividad y biomasa fitoplanctónica están reguladas por condiciones bióticas y abióticas como: la incidencia de la luz, el flujo de aguas dulces, la actividad mareal y la turbidez que juegan un papel crucial en el crecimiento fitoplanctónico y su abundancia en aguas estuarinas (Gil-Aguilar *et al.* 2013, Bijoy-Nandan *et al.* 2014). En la zona interna de la bahía de Málaga, los principales afluentes de agua dulce son el Agujero, la Sierpe, y los tributarios, que son canales productos de escorrentías (Betancourt-Portela *et al.* 2011), por lo tanto, es probable que

las lluvias recurrentes en los meses de muestreo, tengan un efecto significativo sobre los registros de producción, turbidez y concentración de nutrientes, no solo en esta localidad, sino también en San Pedro y Pianguita.

El aumento de las concentraciones de materiales que llegan a la columna de agua durante épocas de lluvia (material particulado y sustancias húmicas en suspensión) provoca un incremento en la turbidez, lo que sumado al ingreso de un mayor volumen de agua continental a los canales de los estuarios, puede disminuir significativamente la abundancia de las células fitoplanctónicas e incluso cambiar la estructura de esta comunidad (Wiedemann 1973, Bijoy-Nandan *et al.* 2014). De acuerdo con Chin-wen *et al.* (2016) en los ambientes estuarinos tropicales se desarrolla una relación negativa de turbidez con la biomasa y la producción primaria. Según estos autores, la productividad de los sistemas estuarinos tropicales estarían limitados por la disponibilidad de luz como consecuencia del efecto de la turbidez, la cual se relaciona con las temporadas de lluvias, dando como resultado una variabilidad temporal de la concentración de clorofila-a y la producción en estos ambientes, similar a lo registrado en la zona de estudio durante la presente investigación.

Quebrada Valencia presenta una influencia riberina mayor, por lo tanto, es probable que el ingreso de agua dulce en la época de lluvias, tenga como resultado una mayor demanda fisiológica del fitoplancton por el incremento de la turbidez registrándose más respiración que producción, similar a la reportado por Granados-Martinez *et al.* (2011) para la Ciénaga Grande de Santa Marta. Sin embargo, a pesar de la reducción en la transparencia del agua, el estuario de Pianguita y San Pedro fueron los más productivos en la zona de estudio. En este sentido, sería de esperar que el balance entre la entrada principal

de energía, vía fitoplancton y vía subsidio, es mayor que los costos de mantenimiento, similar a lo que describió Granados-Martínez *et al.* (2011) para la Ciénaga Grande de Santa Marta.

Aunque varios autores han sugerido que la temperatura tiene un efecto significativo sobre la variación espacial y temporal de la productividad primaria en las zonas estuarinas tropicales (Contreras 1985, Contreras *et al.* 1996), los registros de esta variable en la zona de estudio no se correlacionaron significativamente con la productividad ni con los otros parámetros ambientales registrados durante la presente investigación. Sin embargo, se registraron rangos amplios de variación de la salinidad en las diferentes localidades relacionadas con el sitio y el nivel de marea, estableciéndose una correlación negativa con la biomasa fitoplanctónica (concentración de clorofila-a).

Según Bijoy-Nandan *et al.* (2014), es de esperar una mayor concentración de clorofila-a en ambientes en donde dominen especies fitoplanctónicas marinas. Pero, en ambientes salobres como los canales estuarinos la variación permanente de la salinidad como consecuencias del ciclo de marea sumado a la oferta permanente de nutrientes de origen continental, podría estar generando condiciones ambientales que permitan el desarrollo de una mayor cantidad de células fitoplanctónicas grandes, como las diatomeas, lo que podría provocar un mayor registro de clorofila-a al reducir la salinidad del medio. En este sentido, en la zona de estudio se registraron concentraciones de clorofila-a por encima de los 5 mg/m<sup>3</sup>, concentración que es similar a la reportada por Mandhu *et al.* (2010) en las aguas estuarinas tropicales de Indonesia durante el periodo de lluvias (menor salinidad, mayor disponibilidad de nutrientes).

Es claro que para el crecimiento

fitoplanctónico los nutrientes inorgánicos son uno de los elementos más importantes y generalmente la producción primaria está limitada por la disponibilidad de nitrógeno en el sistema (Contreras *et al.* 1996). En términos generales, la disponibilidad de nitrógeno frecuentemente incrementa el crecimiento del fitoplancton cuando la relación N:P es menor a 6 (Gutiérrez-Mendieta *et al.* 2006), pero el fósforo, hierro o el silicato pueden aumentar el crecimiento fitoplanctónico en aguas estuarinas cuando la N:P total es alta (mayor a 10). La relación Redfield establecida para las dos localidades de estudio indicó que estos sistemas (Pianguita y Valencia) estuvieron en general limitados por el nitrógeno, pero, Valencia presentó una relación inversa en noviembre. Según Redfield (1958), Contreras *et al.* (1996) y Bijoy-Nandan *et al.* (2014) la presencia considerable de PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> se traduce en valores bajos de esta relación llegando inclusive a manifestar valores inversos, esto es, una mayor concentración de fósforo que de nitrógeno.

De acuerdo con Betancourt *et al.* (2011) las concentraciones de nutrientes son mayores en el estero Valencia y zona occidental media de bahía Málaga, aunque en este estudio los valores de nitrógeno en general fueron mayores en Pianguita, probablemente como resultado de fuentes puntuales de ingreso de agua servida al estuario de esta localidad. Además del efecto humano, la interacción con el bosque adyacente aporta materiales orgánicos y nutrientes a los sistemas estuarinos; en este sentido ha sido demostrado que el bosque de manglar puede generar cantidades de nutrientes disueltos que probablemente son aprovechadas para la producción de la comunidad fitoplanctónica local (Kitheka *et al.* 1996).

Aunque se espera una relación directa nutrientes - producción primaria en una localidad, es importante tener en cuenta el desfase temporal de la respuesta biológica

al cambio en las dinámicas ambientales (nutrientes). Además, los valores de producción registrados en una localidad son tanto el resultado del proceso fotosintético, como la relación con el estado sucesional de la comunidad fitoplanctónica, la oferta de micronutrientes a través de los aportes ribereños, la influencia de la marea y el control de la biomasa del fitoplancton vía herbivoría (Zea *et al.* 1998, Rodríguez *et al.* 2009).

La localidad Pianguita, al igual que San Pedro, se encuentra más cerca a la bahía de Buenaventura, por lo tanto las corrientes pueden arrastrar materiales y nutrientes provenientes de diversas actividades antrópicas. En este contexto es probable que gracias al aporte de la bahía de Buenaventura en conjunto con la influencia hotelera, el lavado de suelos, la incidencia directa de las precipitaciones sobre la columna, los procesos de descomposición y remineralización de la materia orgánica que aporta el bosque, la concentración de nutrientes aumente en estas localidades, incrementando su disponibilidad para la incorporación por parte de las células fitoplanctónicas. Esto puede ser evidencia del pico de producción neta y bruta que se presentó en ambas localidades en noviembre.

Las variaciones temporales evaluadas a escala mareal para la zona, mostraron que la producción primaria neta fue significativamente diferente cuando el rango de altura mareal fue alto. La amplitud mareal, la circulación y el tiempo de residencia de las aguas en las zonas estuarinas son factores que influyen sobre la productividad en estos sistemas. Generalmente, la entrada de agua salada proveniente de la conexión con el mar cuando la onda de marea está ingresando al estuario, provoca la re-suspensión de material de fondo hacia la superficie según Kiorboe (1993) y Monteiro & Largier (1999), modificando el ambiente físico y químico

de la columna de agua y determinando la distribución del fitoplancton.

Debido a esto, se puede esperar que haya una variación de corta escala temporal (ciclo de marea) en los niveles de producción en una localidad debido a la variación en la tasa de fijación de carbono bajo las condiciones particulares de cada sitio y el momento del ciclo de marea, ya que menores tiempos de residencia pueden sesgar los registros de producción encontrados en una localidad con respecto a otro sitio, tal y como se encontró en esta investigación al comparar la productividad de Quebrada Valencia con Pianguita o San Pedro. Sin embargo, es importante mencionar que, de los tres sitios, Quebrada Valencia también fue la localidad de menor influencia de oleaje, por estar ubicado al interior de la bahía de Málaga. De acuerdo con Betancourt *et al.* (2011), el oleaje tiende a promover el efecto de re-suspensión de material de fondo y mezcla vertical, incrementando la concentración de nutrientes en los sectores cercanos a las zonas de rompientes.

Al comparar los estimados de productividad fitoplanctónica en la zona de estudio con otros ambientes estuarinos tropicales del Océano Índico, se estableció que estos fueron mayores a los reportados para el estuario de Mandovi-Zuary (28,24 mgC/m<sup>3</sup>/h), Goa, India por Khrishna-Kumari *et al.* 2002, y para el Kodungallur-Azhikode (PNB: 131,67 mgC/m<sup>3</sup>/h y PNN: 63,3 mgC/m<sup>3</sup>/h) por Bijoy-Nandan *et al.* (2014), el cual es considerado hiperproductivo probablemente por el enriquecimiento de nutrientes de diversas fuentes antropicas. De acuerdo con lo anterior y la clasificación que propone Smith (1999) los esteros de Valencia, Pianguita y San Pedro pueden ser catalogados de euproductivos a hiperproductivos, condición que podría sugerir una alta dinámica trófica (Margalef 1983, Montoya & Aguirre 2010) en temporada de lluvias.

Los resultados encontrados aquí representan un punto de referencia y una primera clasificación de las aguas estuarinas evaluadas en temporadas de lluvias. Aunque es pertinente comparar con futuras investigaciones en la zona que incluyan una escala espacio-temporal más amplia, que abarque monitoreos en todos los meses del año incluyendo época de estiaje (pocas precipitaciones) y, de este modo obtener un estimado de la productividad que permita ajustar la clasificación propuesta en este estudio.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco al grupo de Estuarios y Manglares y a Colciencias por el apoyo económico para realizar esta investigación, a mi director Enrique Peña y a mi codirector Alán Giraldo por su disposición y guía en la redacción del documento. Por último, un especial agradecimiento al laboratorio de Fisiología Vegetal y Biología de la Universidad del Valle por su apoyo en el análisis de las muestras.

## LITERATURA CITADA

- Adame, M. and Lovelock, C. (2011), "Carbon and nutrient exchange of mangrove forests with the coastal ocean", *Hydrobiologia*, Vol. 633, pp. 23–50.
- Betancourt-Portela, J., Sanchez-Diazgranados, J., Mejia-Ladino, L. and Cantera-Kintz, J. (2011), "Calidad de aguas superficiales de Bahía Malaga, Pacífico Colombiano", *Acta Biologica Colombiana*, Vol. 16 No. 2, pp. 175-192.
- Bijoy-Nandan, S., Jayachandran, P. and Screedevi, O. (2014), "Spatio-temporal pattern of primary production in tropical coastal wetland (Kodungallur-Azhikode Estuary), south west coast of India", *Coastal Zone Journals*, Vol. 17 No. 2, pp. 1-10.
- Burford, M., Webster, I., Revill, A., Kenyon, R., Whittle, M. and Curwen, G. (2012), "Controls on phytoplankton productivity in a wet-dry tropical estuary", *Estuarine, Coastal and shelf science*, Vol. 113, pp. 141-151.
- Castellanos-Galindo, G. and Krumme, U. (2015), "Tides, salinity, and biogeography affect fish assemblage structure and function in macrotidal mangroves of the neotropics", *Ecosystems*, Vol. 18, pp. 1165-1178.
- Chin-wen, P., Chaung, Y., Chou, L., Meng-Hsien, C. and Hsing-Juh, L. (2016), "Factor governing phytoplankton biomass and production in tropical estuaries of western Taiwan", Elsevier, pp. 88-99.
- Contreras F. (1985), *Las lagunas costeras mexicanas*. Secretaría de Pesca, México.
- Contreras, F., Castañeda L., Torres-Alvarado, F. and Gutiérrez, M. (1996), "Nutrientes en 39 lagunas costeras mexicanas", *Biología Tropical*, Vol. 44 No. 2, pp. 417-425.
- Correa, I. and Morton, R. (2010), "Pacific Coast of Colombia", Bird, E. (Ed.), *Encyclopedia of the world's Coastal Landforms*, Springer, Kingdom of Netherlands, Netherlands, pp. 193-198.
- Devassy, V. and Goes, J. (1989), "Seasonal pattern of phytoplankton biomass and productivity in a tropical estuarine complex (west coast of India)", *Proc Indian Acad Sci (plant sci)*, Vol. 99 No. 5, pp. 485-501.
- Edding, M., Tala, F. and Vázquez, J. (2006), *Fotosíntesis, Productividad y Algas Marinas*, Ediciones Universidad de La Serena, La Serena, Chile.

- Gil-Aguilar, J., Labastida-Estrada, E., Mineros-Ramírez, R., Ramirez-Perez, E. and Tenorio-Romero, R. (2013), “Estimacion de la produccion primaria y biomasa del fitoplactón y su relación con las condiciones ambientales en la laguna de chautengo”, *E-Bios*, Vol. 2 No. 4, pp. 1-16.
- Granados-Martinez, C., Rodriguez-Chila, J. and Salgado Lopez, H. (2011), “Produccion primaria fitoplactonica y metabolismo durante la época lluviosa en la laguna costera estuarina tropical. Cienaga grande de Santa Marta”, *Intropica*, Vol. 6, pp. 9-19.
- Gutiérrez-Mendieta, F., Varona Cordero, F. and Contreras Espinoza, F. (2006), “Seasonal characterization of the physicochemical conditions of two tropical coastal lagoons of the state of Chiapas, México”, *Hidrobiologica*, Vol. 16 No. 2, pp. 137-146.
- IDEAM. (2016), Datos hidrometeorológicos y ambientales, pronósticos promedios anuales, Disponible en: <http://institucional.ideam.gov.co/jsp/index.jsf> [Consultado 15-11-2016].
- Khrishna-Kumari, L., Bhattathiri, P., Matondkar, P. and John, J. (2002), “Primary productivity in Mandovi-Zuari estuaries in Goa”, *Journal of Marine Biology*, Vol. 44 No. 1, pp. 1-13.
- Kiorboe, T. (1993), “Turbulence, phytoplankton cell size, and the structure of pelagic food webs”, *Advances in Marine Biology*, Vol. 29, pp. 1-72.
- Kitheka, J., Ohowa, B., Mwashote, W., Shimbira, W., Mwaluma, J. and Kazung, J. (1996), “Water circulation dynamics, water column nutrients and plankton productivity in a well-flushed tropical estuary”, *Journal of Research*, Vol. 35 No. 4, pp. 257-268.
- Kjerfve, B. (1990), *Manual for investigation of hydrological processes in mangrove ecosystem*, Baruch Institute for marine Biology and Coastal Research, Columbia.
- Lazarus-Agudelo, J. and Cantera Kintz, J. (2007), “Crustáceos (Crustacea: sessilia, stomatopoda, Isopoda, Amphipoda, Decapoda) de Bahía Málaga, Valle del Cauca (Pacífico Colombiano)”, *Biota Colombiana*, Vol. 8 No. 2, pp. 221-190.
- Lucero, C., Cantera Kintz, J. and Neira, R. (2012), “Pesquería y crecimiento de la piangua (arcoída:arcoídae) anadara tuberculosa en la bahía de Málaga del Pacífico colombiano”, *Biología tropical*, Vol. 60 No. 1, pp. 203-217.
- Lugo, A. and Snedaker, S. (1974), “The Ecology of Mangroves”, *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, Vol 5, pp. 39-63.
- Mandhu, N., Balachandran, K., Martin, G., Jyothibabu, R. and Vivekanandan, E. (2010), “Short-term variability of water quality and implications on phytoplankton production in a tropical estuary (cochin backwaters-india)”, *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 170, pp. 287-300.
- Margalef, R. (1983), *Limnologia*, Omega S.A, Barcelona.
- McLusky, D. (2013), *The estuarine ecosystem*, Springer Science & Business Media.
- Mithalpara, S. (2013), *Lagoons and Estuaries*, IUCN Coastal Ecosystems Series, Sri Lanka, Colombo.
- Monbet, Y. (1992), “Control of phytoplankton biomass in estuaries: a comparative analysis of microtidal y macrotidal estuaries”, *Estuaries*, Vol. 15 No. 4, pp. 563-571.
- Monteiro, P.M. and Largier, J.L. (1999), “Thermal stratification in Saldanha Bay (South Africa) and subtidal, density-driven exchange with the coastal waters of the Benguela Upwelling System”. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, Vol. 49 No. 6, pp. 877-890.

- Montoya, Y. and Aguirre J. (2010), “Dinamica de la produccion primaria fitoplactonica en un lago tropical (cienaga grande de escobillitas) a lo largo de un pulso de inundación”, *Universidad de antioquia*, Vol. 55, pp. 76-89.
- Naundorf, G. (2010), Version final texto *productividad material del curso Biótica Acuática I*. Tesis de Mestria en recursos hidrobiologicos continentales, Universidad del Cauca, Colombia.
- Peña Salamanca, E. (2008), “Dinamica espacial y temporal de la biomasa algal asociada a las raices de mangle en la bahia de buenaventura costa Pacifica Colombiana”, *Boletin de Investigaciones Marinas y Costeras*, Vol. 32 No. 2, pp. 55-70.
- Perillo, G. (1995), “Definitions ang gemorphologic classifications of estuaries”, *Developments in Sedimentology*, Vol. 53, pp. 17-47.
- Redfield, A. (1958), “The biological controls of chemical Factor in the enviroment”. *The Scientific Research Society*, Vol. 46 No. 3, pp. 205-221.
- Rivera-Monroy, V., Day, J., Twilley, R., Vera-Herrera, F. and Coronado-Molina, C. (1995), “Flux of Nitrogen and Sediment in a Fringe Mangrove Forest in Terminos Lagoon, México”, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 40, pp. 139-160.
- Rivera-Monroy, V., Madden, C.J., Day, J., Twilley, R., Vera-Herrera, F. and Alvarez Guillén, H. (1998), “Seasonal coupling of a tropical mangrove forest and an estuarine water colum: enhancement of aquatic primary productivity”, *Hydrobiologia*, Vol. 379 No. 1-3, pp. 41-53.
- Smith, V.H., Tilman, G.D. and Nekola, J.C. (1999), “*Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystem*”, Elseiver Science, Vol. 100 No. 1999, pp. 179-196.
- Rodriguez, J., Mancera, J. and Lopez, H. (2009), “Efectos de comunicacion del rio magdalena con su antiguo delta: cambios en la produccion primaria fitoplanctonica y respiracion en el complejo pajarales”, *Boletin de Investigaciones Marinas y Costeras*, Vol. 32 No. 2, pp. 119-144.
- Verma, S., Tiwari, D. and Verma, A. (2012), “Studies on the primary productivity of the river Pandú, Kanpu, India”, *e-planet*, Vol. 10 No. 2, pp. 48-51.
- Wetzel, R. and Likens, G. (1991), *Limnological Analysis*, Springer-Verlag, New York.
- Wiedemann, H. (1973), “Reconnaissance of Cienaga Grande de Santa Marta, Colombia: Physical parameters and geological history”, *Instituto Colombo-Aleman de Investigaciones Cientificas*, Vol. 7, pp. 85-119.
- Zea, S., Giraldo, H., Mancera, J. and Martinez, J. (1998), “Relaciones contemporaneas y rezagadas entre variables fisicoquimicas y biologicas en la Cienaga Grande de Santa Marta, Caribe Colombiano”, *Boletin de Investigaciones Marinas y Costeras*, Vol. 27, pp. 67-85.